

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

*Приладобудівний факультет*

(повна назва інституту/факультету)

*Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації*

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

«                      »

2019 р.

**Дипломний проект**

**освітньо-кваліфікаційного рівня «    бакалавр    »**

(назва ОКР)

з напрямку підготовки (спеціальності)

*6.051003 «Приладобудування»*

(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему:    *Датчик кутової швидкості*

Виконав: студент    *IV*    курсу, групи    *ПГ-51*

(шифр групи)

*Васильчук Денис Андрійович*

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник

*Ассистент Сапегін О.М.*

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

\_\_\_\_\_

(назва розділу)

\_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Консультант

\_\_\_\_\_

(назва розділу)

\_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2019 рік

## Зміст

Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1. Оглядова частина.....	10
1.1. Аналітичний датчиків кутової швидкості.....	10
1.1.1. Гіроскопічні тахометри.....	10
1.1.2. Компенсаційні гіротахометри.....	13
1.1.3. Хвильові твердотільні гіроскопи.....	16
1.1.4. Датчик кутової швидкості на базі гіроскопа з трьома ступенями свободи.....	18
1.2. Основні похибки ДКШ.....	20
РОЗДІЛ 2. Розрахунок та проектування датчика кутової швидкості.....	22
2.1. Оцінка рівня технологічності.....	22
2.2. Опис складальної одиниці.....	22
2.3. Відпрацювання складальної одиниці на технологічність.....	22
2.4. Обґрунтування вибору конструктивної схеми.....	23
2.5. Розрахунок основних параметрів ДКШ.....	24
2.5.1. Вибір датчика кута та датчика моменту.....	24
2.5.2. Визначення габаритів і типу підвісу. Розрахунок основної методичної похибки приладу та елементів підвісу ЧЕ.....	24
2.5.3. Вибір підвісу.....	26
2.5.4. Визначення температури перегріву.....	27
2.6. Математична модель.....	28
Висновок.....	40
Список використаної літератури.....	39
Додаток 1	
Додаток 2	

Додаток 3

Додаток 4

## ВСТУП

### Огляд особливостей застосування датчиків кутової швидкості.

Гіроскопічні вимірювачі кутової швидкості призначена для вимірювання кутової швидкості обертання об'єкта (основи), на яку вони встановлені, і використовуються як візуальні прилади і як чутливі елементи (датчики) в системах автоматичного керування та стабілізації.

На сучасних літака, ракетах і космічних кораблях датчики кутової швидкості (ДКШ) використовують в демпферах рискання, тангажу і крену для покращення характеристик стійкості та керованості літаком, а в автопілотах і системах автоматичного керування – для того, щоб ввести в керуючу функцію сигнал, що пропорційний даній кутовій швидкості. Окрім того, ДКШ широко використовують в системах прицілювання танків і самохідних установок і авіаційних прицілах для вироблення кута упередження пострілу. Також в супутниках та космічних кораблях ДКШ можуть бути використані для демпфування коливань об'єкта. Наприклад в безкарданних системах інерціальної навігації, де кутове положення об'єкта визначається шляхом інтегрування показників ДКШ.

Схема і конструкція ДКШ повинні забезпечувати вимірювання кутової швидкості з точністю в заданому діапазоні частот вібраційних і лінійних перевантажень навіть при різноманітних кліматичних умовах. Варто відмітити, що умови експлуатації ДКШ такі ж самі, що й умови експлуатації акселерометрів [1].

Наявні різні схеми побудови датчиків кутової швидкості. Кутову швидкість можна вимірювати як двох- так і трьохступеневими гіроскопами. Також, окрім звичайних гіроскопів використовують гіроскопи без носія кінетичного моменту, наприклад лазерні гіроскопи, або ж з корпускулярними носіями кінетичного моменту.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

### 1.1. Аналітичний огляд датчиків кутової швидкості

#### 1.1.1. Гіротахометри

Схема і конструкція гіротахометра повинні забезпечувати вимірювання кутової швидкості з точністю в заданому діапазоні частот вібраційних і лінійних перевантажень навіть при різноманітних кліматичних умовах.

Датчик кутової швидкості представляє з себе гіроскоп з двома ступенями свободи, обертання якого навколо осі рамки(кожуха) обмежене пружним зв'язком з корпусом приладу [1].

Гіротахометр складається з таких основних елементів:

- Гіродвигун;
- Рамка або ж кожух гіродвигуна з напівосями;
- Датчик моменту чи пружина, яка може бути як механічною так і електричною, що прикладають момент, який пропорційний куту відхилення;
- Демпфуючий пристрій;
- Змінний пристрій для реєстрації кута відхилення рамки.

Кінематична схема приладу представлена на рис 1. На рисунку позначено:  $\xi, \eta, \xi$  – система координат, що пов'язана з основою приладу,  $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\xi$  – проекції кутової швидкості обертання основина осі  $\xi, \eta, \xi$ ;  $x, y, z$  – системи координат, пов'язані з рамкою(кожухом). Ось  $z$  є віссю власного обертання ротору гіроскопа, а ось  $y$  – вісь чутливості приладу.

При обертанні основи навколо осі  $\xi$  з кутовою швидкістю  $\omega_\xi$  навколо осі рамки виникає гіроскопічний момент  $M_g$ , під дією якого рамка гіроскопа повертається так, що намагається найкоротшим шляхом сумістити вектор кінетичного моменту з вектором кутової швидкості  $\omega_\xi$ . По мірі повороту рамки навколо осі  $x$  під дією гіроскопічного моменту відбувається деформація пружини, в результаті чого виникає момент  $M_{np}$ , який перешкоджає відключенню рамки гіроскопа. Коли момент пружини урівноважить гіроскопічний момент, рамка залишиться в новому положенні

рівноваги, а її кут відхилення  $\beta$  буде характеризувати величину вимірюваної кутової швидкості [1].

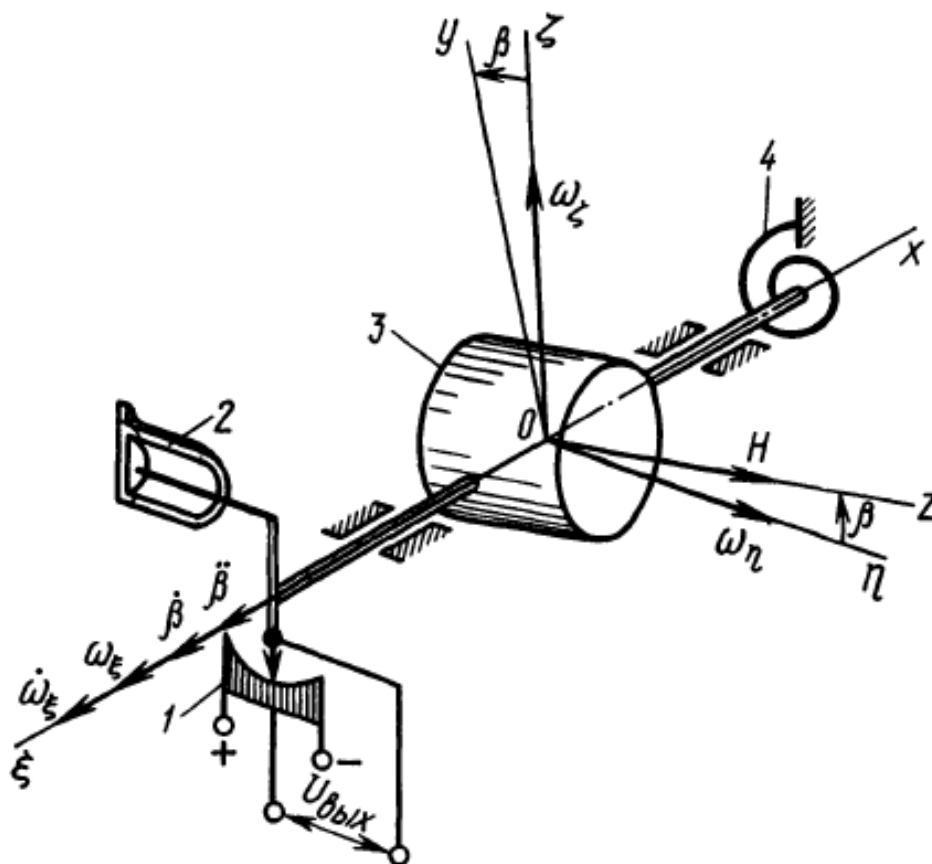


Рисунок 1.1 – Кінематична схема ДКШ.

1 – потенціометричний датчик; 2 – демпфер; 3 – гіроскоп;  
4 – пружина;

Рівняння руху рамки ДКШ відносно корпусу приладу має вигляд [1]:

$$J_x \ddot{\beta} + B \dot{\beta} + k\beta = H\omega_\xi \cos \beta - H\omega_\eta \sin \beta + (J_z - J_y) * (0.5\omega_\xi^2 \sin 2\beta - 0.5\omega_\eta^2 \sin 2\beta + \omega_\xi \omega_\eta \cos 2\beta) - J_x \dot{\omega}_\xi \pm M_x, \quad (1.1)$$

де через  $J_x$ ,  $J_y$ ,  $J_z$  позначаються моменти інерції рухомої системи, а саме рамки та гіромотора, приладу відносно осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

$B$  – питомий момент приведенного моменту тертя;

$M_x$  – зовнішні невраховані моменти.

Якщо в формулі (1) прирівняти до нуля тільки праву частину, то отримаємо диференціальне рівняння, яке буде характеризувати власний рух системи:

$$\ddot{\beta} + 2\xi n_0 \dot{\beta} + n_0^2 \beta = 0, \quad (1.2)$$

Де коефіцієнт затухання, тобто демпфування власних коливань позначається наступним чином

$$\xi = \frac{B}{\sqrt{J_x k}}, \quad (1.3)$$

як показує практика  $\xi < 1$ .

Круглова частота власних коливань приладу має такий вигляд:

$$n_0 = \sqrt{\frac{k}{J_x}} \quad (1.4)$$

Розв'язок рівняння (1.2) має вигляд

$$\beta = a_1 e^{-\xi n_0 t} \sin n_0 \sqrt{1 - \xi^2} t + a_2 e^{-\xi n_0 t} \cos n_0 \sqrt{1 - \xi^2} t; \quad (1.5)$$

де через  $a_1, a_2$  позначені сталі інтегрування, що визначаються за допомогою початкових умов.

Таким чином, власний рух рамки приладу являє собою затухаючі коливання, що відбувається з частотою

Виходячи з вище записаного можна відмітити, що власний рух рамки приладу представляю собою затухаючі коливання, як відбуваються з відповідною частотою:

$$n = n_0 \sqrt{1 - \xi^2}. \quad (1.6)$$

Як видно з рівняння (1.1) вимушений рух рамки породжується моментами, які розташовані в правій частині рівняння, при чому корисним моментом є  $H\omega_\xi \cos \beta$ , коли решта тільки викликають похибки в показаннях приладу [1].

Варто припустити, що  $\omega_\eta = \omega_\xi = 0$ ;  $\ddot{\beta} = \dot{\beta} = 0$ ;  $J_z = J_y$ ;  $\omega_\xi = const$ , і беручи до уваги мале значення  $\beta$ , отримаємо рівність, яка визначає статичне значення кута:

$$\beta = \beta^* = \frac{(H\omega_\xi \pm M_{\dot{\beta}} + M_x)}{k}. \quad (1.7)$$

Формула вихідного сигналу ДКШ має наступний вигляд:

$$U_{ВНХ}^* = k_{nn} \beta^* = \frac{k_{nn}}{k} (H\omega_\xi \pm M_{\dot{\beta}} + M_x) = h_{\xi тек} \omega_\xi, \quad (1.8)$$



де  $k_{nn}$  – передатний коефіцієнт датчика кута ДКШ і підсилювально-перетворювального пристрою, при наявності).

Через  $h_{\zeta_{тек}}$  позначається чутливість приладу.

$$h_{\zeta_{тек}} = \frac{U_{ВІХ}^*}{\omega_{\zeta}}. \quad (1.10)$$

В звичайних випадках прилад характеризується таким значенням:

$$h_{\zeta_{тек}} = \frac{U_{ВІХ \max}}{\omega_{\zeta \max}}, \quad (1.11)$$

де  $U_{ВІХ \max}$  - вихідна напруга ДКШ, яка пропорційна максимальній кутовій швидкості  $\omega_{\zeta \max}$  [1].

Діапазон вимірювання кутових швидкостей гіроскопічного тахометра обмежується знизу рівнем власних шумів, в тому числі, що спричиняють неконтрольовані шкідливі моменти, що діють навколо осі підвісу ЧЕ, також значну частку шумів вносять моменти сил сухого тертя на осі підвісу. На відміну від нижнього діапазону, верхній немає ніяких обмежень [1].

### 1.1.2. Компенсаційні гіроскопічні тахометри

Розробка гіроскопічних тахометрів має одну важливу особливість, а точніше протиріччя. Щоб зменшити похибку вимірювання кутової швидкості необхідно максимально зменшити кут повороту рухомої частини приладу, що ускладнює збереження необхідної точності вимірювача кутів.

Задля подолання цього протиріччя необхідно використати схему вимірювання, що не вимагає виміру механічної величина, а саме кута  $\beta$ . Цю вимогу можна реалізувати, застосувавши компенсаційний метод виміру гіроскопічного моменту.

Для кращого розуміння принципу роботи компенсаційного методу розглянемо принцип роботи гіроскопічного тахометра з компенсаційним методом вимірювання гіроскопічного моменту (рис. 1.2). Принцип роботи даного методу полягає у врівноваженні гіроскопічного моменту компенсаційним моментом, що створюється за

допомогою датчиком моменту, який в свою чергу керується електричним вимірювачем кута  $\beta$  [3].

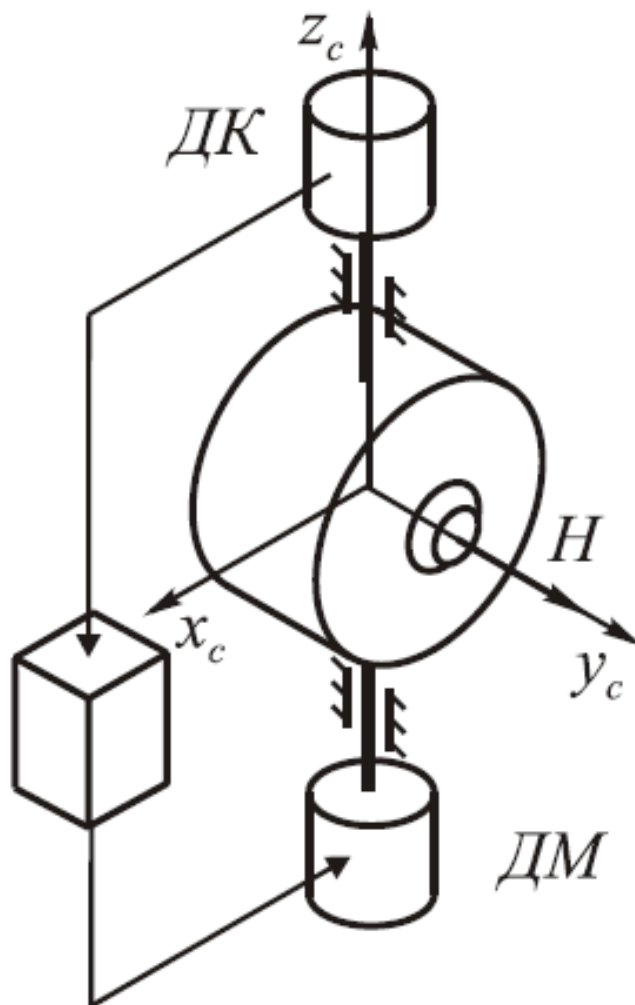


Рисунок 1.2 – гіроскопічний тахометр з кінематичною схемою

Запишемо рівняння руху гіроскопічного тахометра з компенсаційною схемою підключення

$$I_1 \ddot{\beta} + f \dot{\beta} = H U_{xc} + M_{DM} \quad (1.12)$$

де  $M_{DM}$  – момент, що виникає від датчика моменту.

В сучасних конструкціях використовують магнітоелектричні датчики моменту з сталими магнітами.

В сучасних гіроскопічних тахометрах, щоб забезпечити добротність більше за 500 одиниць використовують датчики кутової швидкості з електричними пружинами. Формула коефіцієнта передачі ДКШ з електричної пружини виглядає наступним чином:

$$h_{\zeta} = \frac{Hk_{\Pi\Pi}R_{ET}}{(k_{EP} + k_{\Pi} + H\omega_{\eta})}, \quad (1.13)$$

де  $k_{\Pi\Pi}$  - коефіцієнт передачі підсилювально-перетворювального пристрою;

$R_{ET}$  - еталонний опір;

$k_{EP} = k_{\Pi\Pi} * k_{Д.М.}$  - жорсткість електронної пружини, або коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру. З формули (1.6) видно, що вибравши величину

$k_{EP} \gg k_{\Pi} + \omega_{\eta \max}$ , забезпечується незалежність вихідної характеристики ДКШ від параметрів датчика кута, підсилювача та підвісу, а також від впливу перехресної кутової швидкості. Точність ДКШ у цьому випадку визначається тільки стабільністю коефіцієнта передачі датчика моменту  $H$  і  $R_{ET}$ .

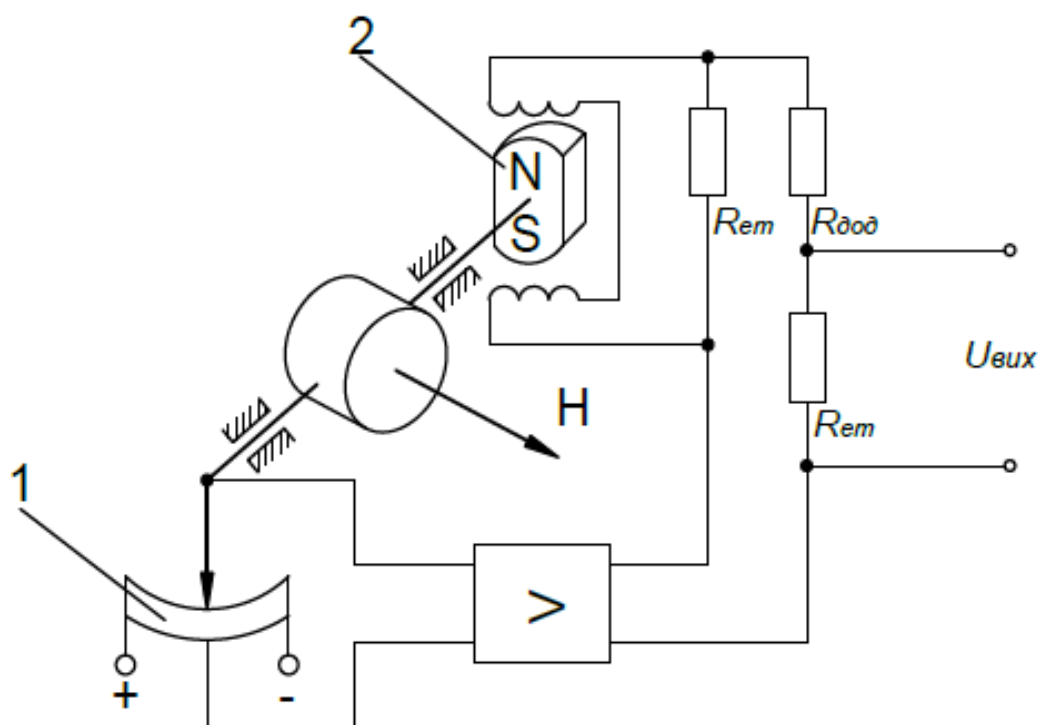


Рисунок 1.3 – Схема ДКШ з електричною пружиною

1 – датчик кута, 2 – датчик моменту.

При сталих динамічних характеристиках ДКШ  $h_{\zeta}$  можна змінювати, змінюючи

$$\frac{R_{ДОБ}}{R_{ET}}.$$

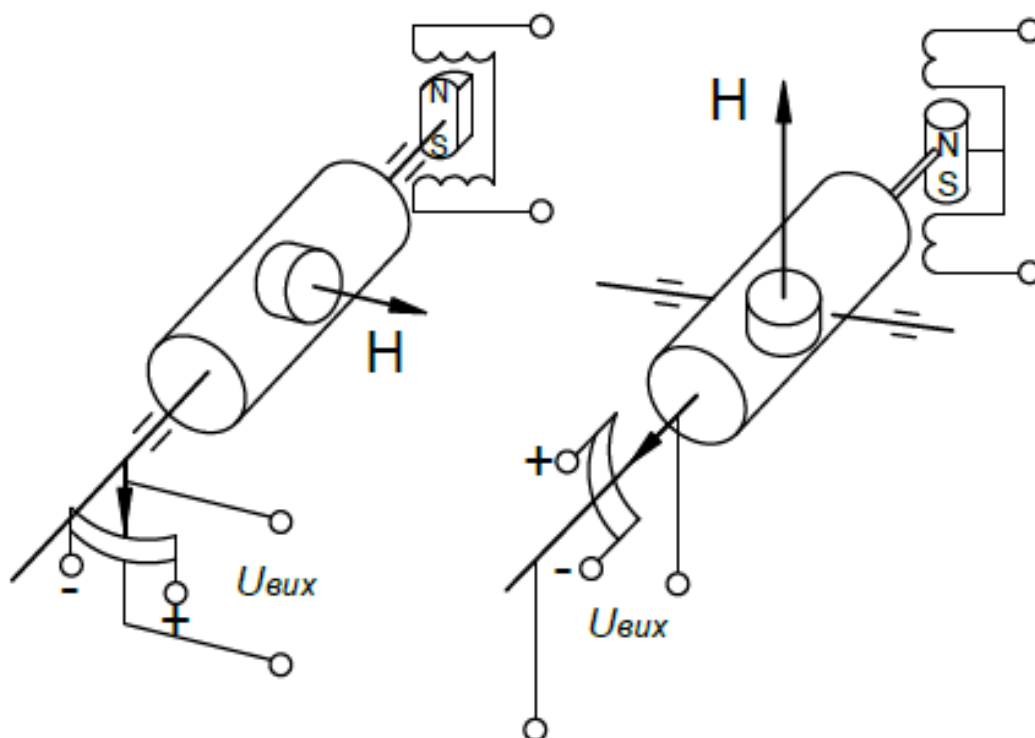


Рисунок 1.4 – Схема ДКШ з поздовжнім (ліва) та поперечним (права) розташуванням опор

Коли необхідно забезпечити високу точність характеристики ДКШ, а саме  $\omega_{\zeta \min} \leq 0.01 \text{ град} / \text{с}$ , та коли наявні великі лінійні та вібраційні перевантаження застосовують поплавкові прилади. Поплавкові прилади поділяються на два типи:

- Повне зважування гіровузла;
- Неповне зважування гіровузла [1].

На даний момент використовують дві кінематичні схеми побудови ЧЕ ДКШ з електричною пружиною, які різняться між собою розташування датчиків моменту, датчиків кутів та розташуванням опор ЧЕ.

### 1.1.3. Хвильові твердотільні гіроскопи.

На даний момент багато провідних країн світу проводять інтенсивні розробки та дослідження хвильових твердотільних гіроскопів (ХТГ) для того, щоб використати його переваги над ДНГ та отримати в результаті гіроскоп середнього класу точності з малими габаритами. Принцип роботи ХТГ (рис. 1.5) базується на ефекті Брайана, який полягає в тому, що оболонка, що вібрує при обертанні навколо осі симетрії,

завдяки дії сил Коріоліса відбувається прецесія пружних стоячих хвиль в інерційному просторі.

Існують ХТГ на базі напівсферичної та циліндричної оболонки (резонатора).

Діапазон використання даного гіроскопу достатньо великий, починаючи з ЧЕ систем автоматичного керування наземними об'єктами до інерційних систем, що використовуються в аерокосмічній галузі.

Значна частина конструкцій ХТГ побудована на базі напівсферичного резонатора. Гіроскоп з напівсферичним резонатором HRG 130Y, що створений американською фірмою Litton, широко використовуються в космічній галузі. Його резонатор має діаметр 30 мм, дає низькі шуми, може працювати при значних температурах.

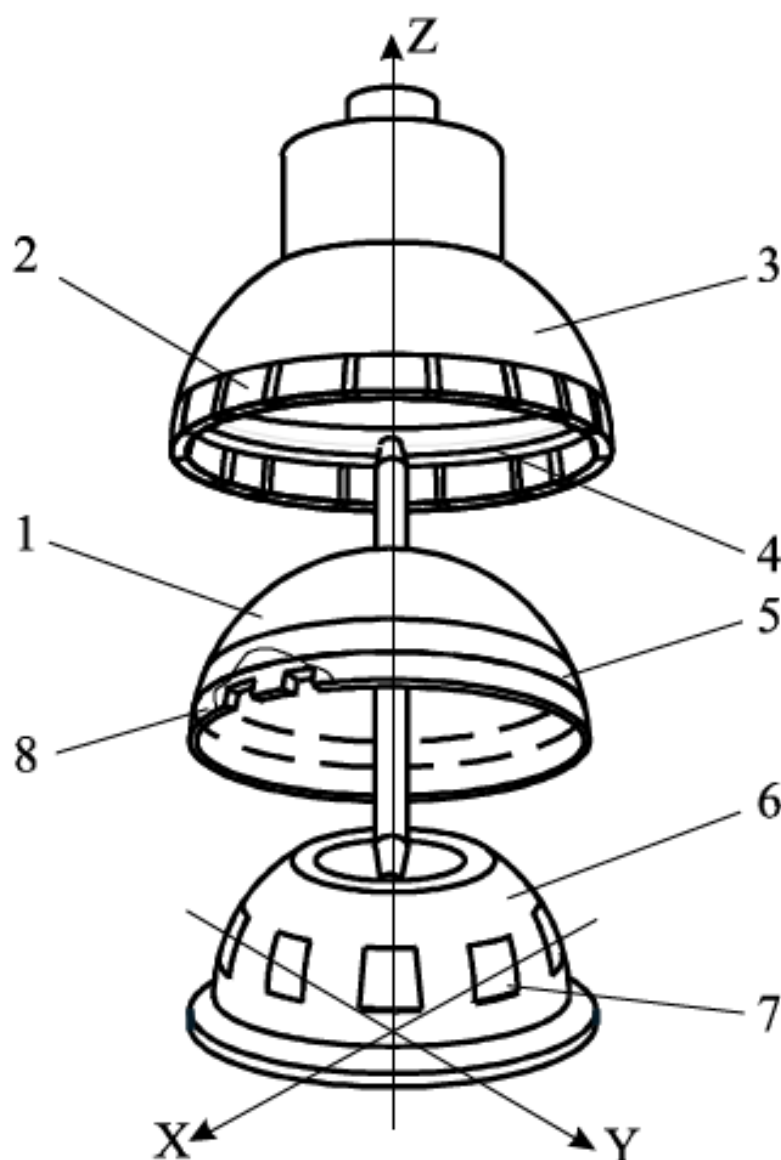


Рисунок 1.5 – Схема конструкції ХТГ

1 – резонатор, 2 – верхній корпус, 3 – нижній корпус, 4 – зона балансування, 5 – кільцевий електрод резонатора, 6 – кільцевий електрод параметричного збудження, 7 – електрод системи позиційного збудження, 8 – давачі системи зйому інформації.

#### 1.1.4. Датчик кутової швидкості на базі гіроскопа з трьома ступенями свободи

На рис. 1.5 представлена схема гіроскопа з трьома ступенями свободи для зміни кутових швидкостей  $\omega_{y1}$  та  $\omega_{x1}$ . Запропонуємо, що основа, на якій встановлений пристрій, обертається з кутовою швидкістю  $\omega_{y1}$  навколо осі  $y_1$ . Так як прилад являю собою гіроскоп з трьома ступенями свободи, то при повороті основи на кут з швидкістю  $\omega_{y1}$  гіроскоп буде намагатися зберегти вектор  $\vec{H}$  нерухомим в просторі. Щітка потенціометра 3 буде в перший момент час разом з вектором  $\vec{H}$  залишатися нерухомою, так як вона зв'язана з зовнішньою рамкою гіроскопа [2].

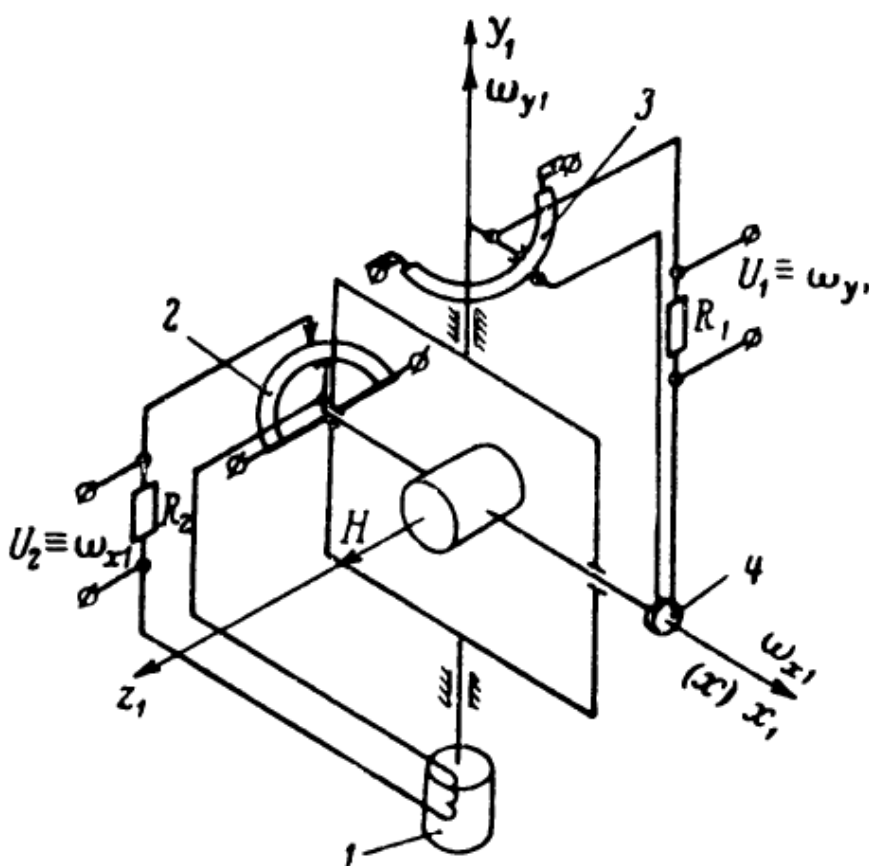


Рисунок 1.5 Схема гіроскопа з трьома ступенями свободи для вимірювання кутових швидкостей

1 та 4 – датчики моментів; 2 та 3 – потенціометри.

Потенціометр 3, що закріплений на корпусі приладу, обернеться разом з основою на деякий кут  $\alpha$ . Сигнал, пропорційний куту неузгодженості  $\alpha$ , з потенціометром 3 по осі  $x$  гіроскопа. В результаті надходження сигналу неузгодженості датчик моменту 4 створить коректуючий момент  $K\alpha$  такого знаку, що відносно осі  $y_1$  виникне швидкість прецесії  $\omega_{np}$  гіроскопа в напрямку швидкості  $\omega_{y1}$  повороту основи

$$\omega_{np} = \frac{K\alpha}{H},$$

Де  $K$  – крутизна моментної характеристика датчика

Поки швидкість прецесії  $\omega_{np}$  менше швидкості повороту виробу  $\omega_{y1}$ , кут неузгодженості  $\alpha$  буде збільшуватися. При цьому буде збільшуватися коректуючий момент  $K\alpha$  та швидкість прецесії [2].

Коли швидкість прецесії  $\omega_{np}$  зрівняється зі швидкістю повороту  $\omega_{y1}$ , то на потенціометрі зафіксується стає значення кута  $\alpha = const$ , тобто

$$\omega_{np} = \frac{K\alpha}{H} = \omega_{y1},$$

Звідки

$$\alpha = \frac{\omega_{y1}}{\frac{K}{H}}$$

Таким чином, кут неузгодженості  $\alpha$  пропорційний вимірюваній кутовій швидкості  $\omega_{y1}$ .

Напруга  $U_1 = iR_1$ , знята з опору  $R_1$  (рис. 1.5) пропорційна вимірюваній кутовій швидкості  $\omega_{y1}$ , так як струм  $i$  пропорційний куту  $\alpha$ :

$$i = k_{\alpha am} \alpha,$$

де  $k_{\alpha am}$  - коефіцієнт пропорційності потенціометра 3.

При вимірюванні кутової швидкості  $\omega_{y1}$  потенціометр 2 і датчик моменту 1 підтримують ось ротора перпендикулярно осі зовнішньої рамки  $y_1$ . Якщо є кутова швидкість  $\omega_{x1}$  виробу, то аналогічно зміні кутовій швидкості  $\omega_{y1}$  з опору  $R_2$  можна отримати сигнал, пропорцій швидкості  $\omega_{x1}$  [2].

## 1.2. Основні похибки ДКШ

Звертаючи увагу на формули (1.1) та (1.8) можна прийти до висновку, що статична похибка з'являється в результаті дії на рухомий вузол шкідливих моментів, в результаті перешкоджаючи його руху, що викликається гіроскопічним моментом.

Варто відмітити, що основу похибок створюють момент тертя  $M_{TP}$ , момент тяжіння  $M_{ТЯЖ}$  та момент, викликаний відключенням рухомого вузла приладу [1].

### Поріг чутливості.

Поріг чутливості приладу визначається наступною формулою:

$$\omega_{\xi \min} = \frac{\sqrt{M_{TP}^2 + \Delta M_{ТЯЖ}^2}}{H}, \quad (1.14)$$

де  $\Delta M_{ТЯЖ}$  - змінна складова моменту тяжіння, тобто похибка нелінійності ДКШ, що викликана наявністю  $M_{TP}$ :

$$\delta_{mp} = \frac{2M_{mp}}{H\omega_{\xi \max}} * 100\%; \quad (1.15)$$

Нульовий сигнал ДКШ виражається наступним чином:

$$\omega_{\xi_0} = \frac{M_{ТЯЖ}}{H} + \frac{M_{РОЗБ.}}{H}. \quad (1.16)$$

**Динамічна похибка.** Дана похибка аналогічна динамічній похибці акселерометра [1].

При необхідності виміру кутової швидкості з заданою похибкою в заданих діапазонах, як динамічному так і частотному похибка вимірювання набуває наступний вигляд:



$$\delta_{дин} = (\lambda - 1) * 100\%, \quad (1.17)$$

де коефіцієнт динамічної чутливості приладу  $\lambda$  має наступний вигляд

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{n_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 * \left(\frac{\omega}{n_0}\right)^2}}. \quad (1.18)$$

Так як динамічна похибка аналогічна відповідній похибці акселерометра, то запишемо її:

$$\Delta\varphi_{\xi}(t) = \frac{\omega_{\xi}(t)2\xi}{n_0}. \quad (1.19)$$

ДКШ відрізняється від акселерометра тим, що більшість похибок обумовлена конструкційними особливостями гіромотору.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ДАТЧИКА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ**

### **2.1. Визначення рівня технологічності**

Технологічність виробу – це якісний показник, що характеризується оцінкою порівняння вказаних характеристик виробництва з уже наявними.

Під рівнем технологічності виробів розуміють, на скільки просте складання виробу загалом та його окремих частин та селективного складання. Технологічними є вироби, що забезпечують паралельність складання, можливість диференціації складання, найбільшу уніфікації та можливість використання автоматизації процесів складання при найменшій кількості матеріалів та обладнання.

### **2.2. Описання складальної одиниці**

В даному дипломному проекті об'єктом аналізу обрано складальну одиницю датчика кутової швидкості. Головними технологічними задачами, котрі повинні бути розв'язані при виготовленні та складанні пристрою є:

1. Точне виготовлення основних деталей;
2. Точне проведення збірки елементів задля забезпечення точності роботи приладу.

### **2.3. Відпрацювання складальної одиниці на технологічність**

Під технологічністю конструкції приладу чи складальної одиниці розуміють її властивість, яка дає змогу скласти даний виріб якомога швидше, використовуючи прості та прогресивні технологічні процеси. Технологічність виробів слід розглядати, враховуючи масштаб виробництва та програму випуску виробу. Конструкція буде вважатися технологічною, якщо вона має невисоку трудомісткість виготовлення, низьку собівартість, короткий цикл складання, відносно високий рівень уніфікації, стандартизації методів виготовлення та укладання, що мають високу точність та надійність.

## 2.4. Обґрунтування вибору конструктивної схеми

Одним з перших та основних кроків проектування ДКШ є визначення

добротності за наступною формулою:  $\frac{\omega_{\zeta_{\max}}}{\omega_{\zeta_{\min}}} = \frac{50}{0,1} = 500$ .

Таке значення добротності може бути реалізована в ДКШ як з механічною, так і з електричною пружиною, оберемо ДКШ з електричною пружиною. Варто враховувати значні величини перевантажень  $\dot{V}_\eta$ ,  $\dot{V}_\xi$ ,  $\dot{V}_\zeta$ , а також відносно великий діапазон зміни температури зовнішнього середовища та малого значення  $\omega_{\zeta_{\min}}$ . Враховуючи перераховані особливості оберемо ДКШ поплавкового типу та повного зважування рухомого вузла. Виходячи з даного температурного діапазону та недопустимості термостатування, оберемо рідину з  $\gamma_{\text{рід}} = 1 \cdot 10^4 \text{ Н / м}^3$ .

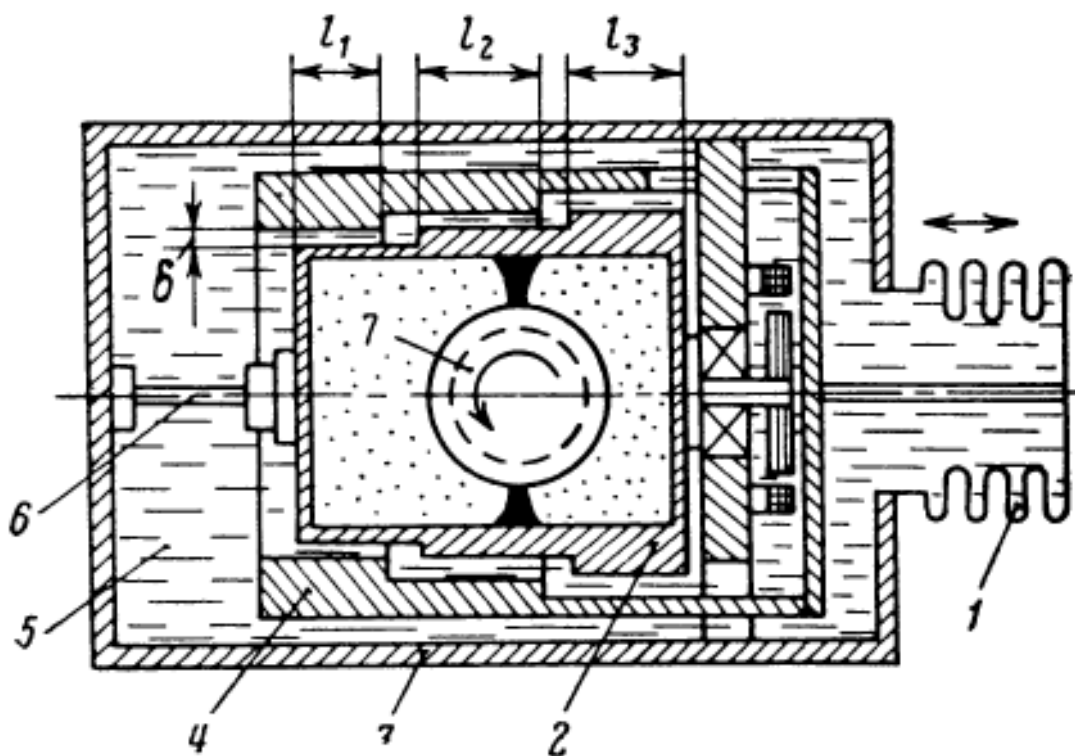


Рисунок 2.1 – Схема датчика кутової швидкості з рідинним заповненням

1 - сильфон, 2 – поплавок, 3 – корпус, 4 – втулка, 5 – рідина,  
6 – торсіон, 7 – гіромотор.

ДКШ з рідинним заповненням мають певні переваги над іншими ДКШ, а саме:

- Менші габарити (в порівнянні з іншими ДКШ);
- Дешевизну виготовлення;

- Простота виготовлення в технологічному відношенні.

Наявність рідини надає свої переваги:

- Зменшення коефіцієнту тертя підшипників;
- Сприяння демпфуванню вимушених коливань гіровузла, що викликані динамічною незбалансованістю ротора гіромотора;
- Кращий відвід теплової енергії від гіромотора, датчиків кута та моменту, що дозволяє збільшити допустиму густину струму;
- Зменшення зношування потенціометра і забруднення його контактної поверхні;
- Збільшується вібростійкість струмовідводів.

## **2.5. Розрахунок основних параметрів ДКШ.**

### **2.5.1 Вибір датчика кута та датчика моменту**

У відповідність з рекомендацій параграфу 2.7[1] варто обрати датчик моменту магнітоелектричного типу та відповідно до нього датчик кута індукційного типу.

Магнітну систему ДМ розташуємо на корпусі ДКШ.

### **2.5.2. Розрахунок габаритів і визначення типу підвісу. Розрахунок основної методичної похибки приладу та елементів підвісу чутливого елемента.**

Враховуючи, що вага приладу  $G_{ДКШ} = 2H$ , визначимо його об'єм  $V_{ДКШ}$  та площу поверхні приладу  $S_{ДКШ}$ . При цьому врахуємо, що для приладів з повним

зважуванням рухомого вузла  $\gamma_{ДКШ} = 3 \cdot 10^4 \frac{H}{M^3}$ .

**Вхідні дані дипломного проекту:**

$$\omega_{\zeta_{\max}} = \pm \frac{50^\circ}{c}, \delta(\omega_\eta) \leq 0,2 \%, \omega_{\zeta_{\min}} = \frac{0.1^\circ}{c}, \delta_{\text{дин}} = 0,3\%,$$

$$\dot{V}_{\eta_{\max}} = \dot{V}_{\xi_{\max}} = \dot{V}_{\zeta_{\max}} = 4g, G_{\text{оу}} = 2H, t_c = \pm 50^\circ C.$$

**Розрахуємо габарити та величину кінетичного моменту**

Знайдемо наступні величини:

$$\gamma_{ДКШ} = 3 \cdot 10^4 \frac{H}{M^3};$$

$$V_{ДКШ} = \frac{G_{ДКШ}}{\gamma_{ДКШ}} = \frac{2}{(3 \cdot 10^4)} \approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

ДКШ, що був правильно спроектований має форму циліндра, довжина якого в 2.5 рази більша за його діаметр.

$$D_{ДКШ} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{ДКШ}}{2.5 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{2.5 \pi}} \approx 3.7 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 3,7 \text{ см};$$

$$L_{ДКШ} = 2.5 \cdot D_{ДКШ} = 2.5 \cdot 3.7 \cdot 10^{-2} = 9,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Розрахуємо площу поверхні  $S_{ДКШ}$ :

$$S_{ДКШ} = 3 \cdot \pi \cdot D_{ДКШ}^2 = 3 \cdot \pi \cdot (3.7 \cdot 10^{-2})^2 \approx 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Розрахуємо потужність елементів приладу  $P_{ДКШ}$ :

$$P_{ДКШ} = k_1 \cdot \alpha \cdot S_{ДКШ} \cdot (t_{p \max} - t_{c \max}) = 1.2 \cdot 7 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} (80^\circ - 50^\circ) = 3,3 \text{ Вт},$$

де  $\alpha = 7 \div 9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$  – для повітря при нормальному тиску;

$k_1 = 1,2 \div 1,5$  - теплопередача через елементи кріплення до об'єкту.

Визначимо максимальний діаметр гіромотору:  $0.7 \cdot D_{ДУС} \approx 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$

**Розрахуємо основну методичну похибку приладу та визначимо елементів підвісу чутливого елемента.**

Для розрахунку основної методичної похибки складемо розрахункову таблицю

**Таблиця 1**

$H$	$P_{ГМ}$	$G_{ГМ}$	$M$	$P_{Д.М}$	$\frac{M}{\sqrt{P_{Д.М}}}$	$G_{Д.М.}$	$G_{Д.М.} + G_{ГМ}$	$V_{Р.В}$
1,5	2,05	0,55	1,1	0,9	1,2	1,25	1,8 Не проходить	-
1,0	1,95	0,45	0,7	1	0,7	0,8	1,25 Не проходить	-

0,5	1,85	0,4	0,4	1,1	0,4	0,3	0,7 Проходить	$0,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ Не проходить
0,25	1,80	0,375	0,2	1,2	0,2	0,1	0,475 Проходить	$0,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ Не проходить
0,1	1,77	0,36	0,07	1,2	0,06	0,06	0,42 Проходить	$0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ Проходить

Для датчика кутової швидкості з  $H = 0.1 \text{ Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с}$  маємо:

$$G_{P.B} = 1.4 \cdot (0.36 + 0.1 \cdot 0.06) = 0.5124 \text{ Н}, V_{P.B} = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Розрахуємо розміри поплавкового вузла:

$$D_{P.B} = 0.85 \cdot D_{ДКШ} = 0.85 \cdot 3.7 = 3.2 \text{ см};$$

$$L_{P.B} = \frac{V_{P.B} \cdot 4}{\pi \cdot D_{P.B}^2} = \frac{50 \cdot 4}{\pi \cdot 3.2^2} = 6.2 \text{ см}.$$

Розрахунок розмірів датчика моменту

$$V_{Д.М} = \frac{G_{Д.М}}{\gamma_{Д.М}} = \frac{0.06}{(6.25 \cdot 10^{-2})} \text{ см}^3 = 0.96 \text{ см}^3;$$

$$D_{Д.М} = 0.85 \cdot D_{ДКШ} = 0.85 \cdot 3.7 = 3.15 \text{ см};$$

$$L_{Д.М} = \frac{V_{Д.М} \cdot 4}{\pi \cdot D_{Д.М}^2} = \frac{0.96 \cdot 4}{\pi \cdot 3.15^2} = 0.12 \text{ см}.$$

### 2.5.3. Вибір підвісу чутливого елемента

Знаходимо

$$M_{OB} \leq \omega_{\xi \min} \cdot H = 1.8 \cdot 10^{-4};$$

Врахуємо, що для поплавкових приладів при  $M^* \approx 0$ .

$$m = \frac{G_{pv}}{g} = \frac{0.5124}{9.81} = 0.052 \text{ Н};$$

$$R_1 = m\dot{V}_{\xi} = 0,052 * 40 H = 2,08 H;$$

$$R_2 = m\dot{V}_{\eta} = 0,052 * 40 H = 2,08 H;$$

$$L = 0.75 * L_{DKIII} = 0.75 * 9.25 * 10^{-2} = 6.9 * 10^{-2} m = 6.9 cm;$$

$$A = m * \dot{V}_{\xi} = 2.08 H;$$

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} = \sqrt{2.08^2 + 2.08^2} = 2.94 H;$$

$$M = k_{TP.pad} * R + k_{TP.oc} * A = k_{TP.pad} * 2.94 + k_{TP.oc} * 2.08;$$

$$M_{OB} = M_{TP} + \Delta M_{OB} \approx k_{TP.pad} * 2.94 + k_{TP.oc} * 2.08;$$

$$\omega_{\xi \min} \geq \frac{M_{BP}}{H} = k_{TP.pad} * 5.88 + k_{TP.oc} * 4.16.$$

Беручи до уваги, що  $\omega_{\xi \min} = \frac{0.1^{\circ}}{c}$  та припустивши, що  $k_{TP.pad} \approx k_{TP.oc}$ ,

отримаємо  $k_{TP.pad} < 0.000179 cm$ ;  $k_{TP.oc} < 0.000179 cm$ .

За допомогою кам'яних підвісів забезпечимо виконання умов  $k_{TP.pad}, k_{TP.oc}$ .

Оберемо діаметра цапфи  $d_{Ц} = 0,7 mm$ , в результаті отримаємо коефіцієнт тертя  $\mu_1 = 0.037$ . Проте, враховуючи, що наявність змазки та вібрація, що утворюються гіромотором, приводять до зменшення тертя в 3-5 рази, що дозволить використовувати в якості підвісу рухомого вузла кам'яні підшипники з  $d_{Ц} = 0,7 mm$ .

#### 2.5.4. Визначення температури перегріву

Знаходимо:

$$t_{H.П} = 0.5 * (t_{c \max} + t_{c \min}) + t_{nep},$$

$$де t_{nep} = \frac{(P_{Д.М} + P_{ГМ} + P_{Д.К} + P_0)}{S\alpha k} = \frac{1.2 + 0.36 + 0.1 * (1.2 + 0.36)}{1.2 * 0.7 * 10 * 1.8 * 10^{-2}} = 10^{\circ}.$$

$$t_{H.П.} = 0^{\circ} + 10^{\circ} C;$$

$$t_{p \max} = 60^{\circ} C;$$

$$t_{p \min} = -40^{\circ} C.$$

## 2.6. Математична модель

Рівняння руху двоступеневого ГТ з механічним пружинним зв'язком. Лінеаризоване рівняння

Складемо рівняння руху ГТ з рис. 1. В якості опорної системи координат використаємо систему  $O\xi\eta\zeta$ , пов'язану з рухомим об'єктом. Рухому частину приладу будемо характеризувати осями Резаля, а системою координат  $Oxyz$ , пов'язаною з кожухом гіроскопа (рис. 2.2)

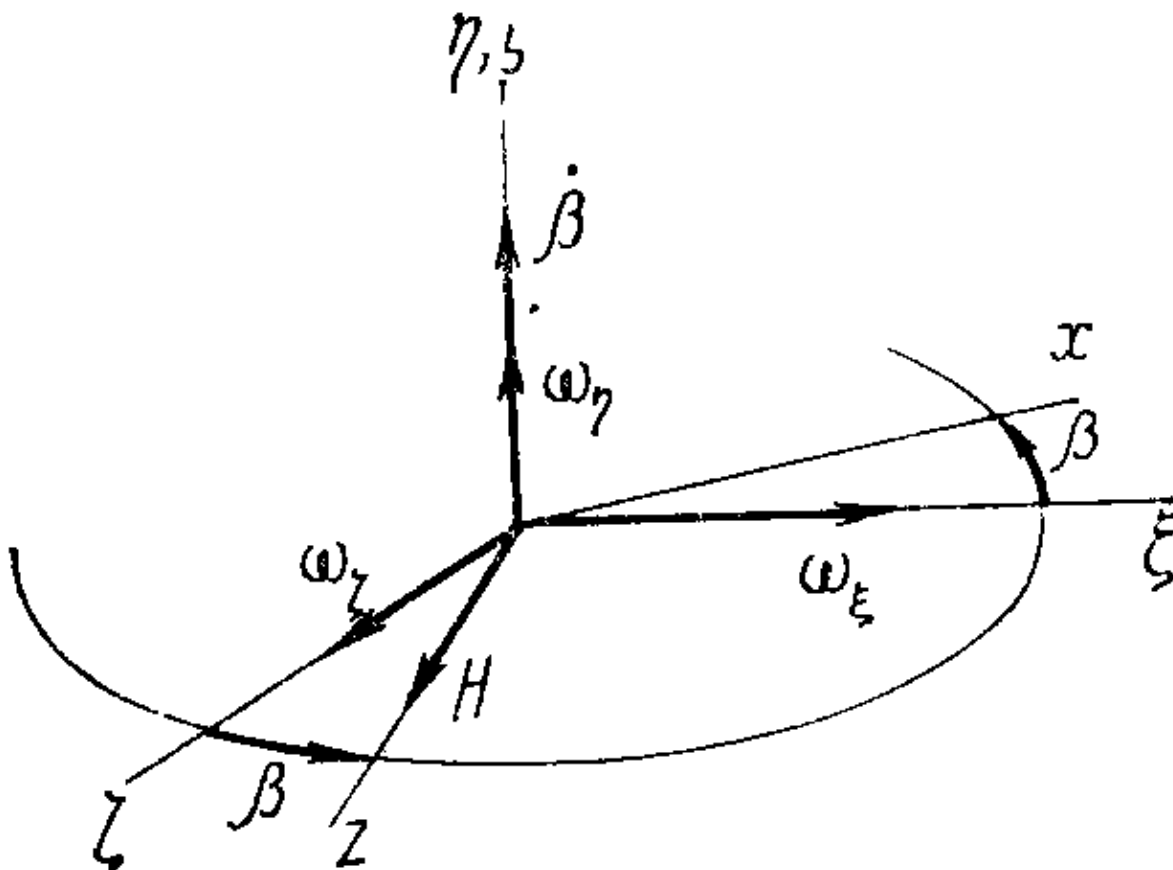


Рисунок 2.2 Кінематичне креслення

Для виведення рівнянь руху приладу використаємо теорему про зміну моменту кількості руху

$$\frac{d\tilde{K}}{dt} + \omega \times K = M. \quad (2.1)$$

В проекції на вісь  $y$  підвісу гіродвигуна цей вираз виглядає:

$$\frac{dK_y}{dt} + \omega_z K_x - \omega_x K_z = M_y. \quad (2.2)$$

Припустимо, що абсолютна кутова швидкість рухомого об'єкта задана складовими  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ . Користуючись кінематичним кресленням (рис.2.2), складемо



вираз складових абсолютної кутової швидкості рухомої частини приладу в осях Резаля:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \omega_\xi \cos \beta - \omega_\zeta \sin \beta; \\ \omega_y &= \omega_\eta + \beta; \\ \omega_z &= \omega_\xi \sin \beta + \omega_\zeta \cos \beta.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Позначимо  $J_0$  та  $J_E$  осьовою та екваторіальними моментами інерції симетричного ротора гіроскопа, а  $J_{kx}, J_{ky}, J_{kz}$  - моменти інерції його кожуха (і пов'язаних з ним деталей та елементів) відносно осей Резаля. Дані моменти інерції будемо вважати за головні. Тоді складові моменту кількості руху гіроскопа в осях Резаля можна представити в вигляді:

$$\begin{aligned}K_x &= J_x \omega_x; \\ K_y &= J_y \omega_y; \\ K_z &= J_0 \gamma + J_z \omega_z.\end{aligned}\tag{2.4}$$

$$\text{де } J_x = J_e + J_{kx}; J_y = J_e + J_{ky}; J_z = J_e + J_{kz}.$$

При розгляданні принципу роботи ГТ була встановлена залежність від кінетичного моменту гіроскопа статичного коефіцієнту передачі приладу. Ця обставина змушує приділяти більше уваги стабільності кінетичного моменту гіроскопа. Тому будемо рахувати номінальним значенням кінетичного моменту тільки ту його частину, яка може бути забезпечена стабільною, а саме ту, яка обумовлена обертанням ротора гіроскопа відносно статора. Інакше кажучи, позначимо [1]

$$H = J_0 \gamma.\tag{2.5}$$

Після підстановки в формулу (2.1) вирази (2.3)...(2.5), отримаємо

$$\begin{aligned}J_y(\dot{\beta} + \omega_\eta) - H(\cos \beta - \omega_\xi \sin \beta) + (J_x - J_z)(\omega_\xi \cos \beta - \\ - \omega_\zeta \sin \beta)(\omega_\xi \sin \beta + \omega_\zeta \cos \beta) = M_y.\end{aligned}\tag{2.6}$$

Запишемо тепер аналітичний вираз моментів  $M_y$  зовнішніх сил, діючих відносно осі  $y$  підвісу гіродвигуна. Врахуємо момент сил пружності пружини  $-c\beta$ , момент сил демпфування -  $f\dot{\beta}$ , момент сил сухого тертя -  $M_T \text{sign} \beta$  і момент дебалансу. Моменти, створювані струмовідводами, електричним датчиком кута, опором середовища при повороті гіродвигуна будемо рахувати врахованими в моменті сил пружності, в'язкого та сухого тертя.

Кутова жорсткість пружного зв'язку  $c$  має сенс моменту сил пружності пружини при одиничному значенні (1 рад) кута  $\beta$  повороту рухомої частини приладу

відносно нейтрального положення. При повороті рухомої частини приладу на малий кут  $\beta$  кожна з двох пружин деформується на  $\Delta l = l_{\Pi} \beta$ , де  $l_{\Pi}$  - довжина плеча, на якому сили пружності пружини створюють момент відносно осі підвісу гіродвигуна (рис. 2.4) [1].

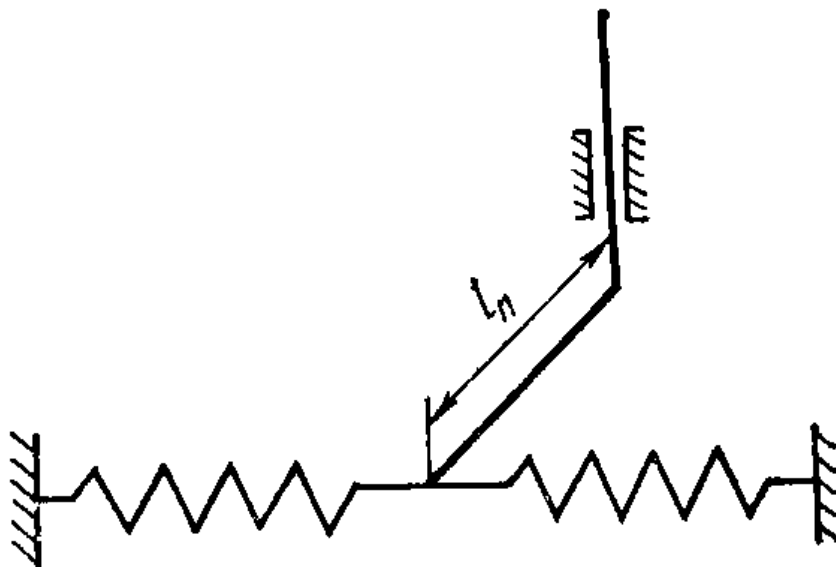


Рисунок 2.3 Вузол зв'язку пружини з гіродвигуном

При цьому сила пружності, що створюється двома пружинами,  $F_y = c_{\Pi} \Delta l = c_{\Pi} l_{\Pi} \beta$ ,  $c_{\Pi}$  - лінійна жорсткість двох пружин, що рівна подвоєній жорсткості однієї пружини.

Момент сил пружності відносно осі підвісу гіродвигуна

$$M_{np} = F_y l_{\Pi} = c_{\Pi} l_{\Pi}^2 \beta. \quad (2.7)$$

З поставленого виразу (2.7) з раніше введеним виразом моменту сил пружності  $c\beta$  слідує, що кутова жорсткість

$$c = c_{\Pi} l_{\Pi}^2. \quad (2.8)$$

Аналогічно можна показати, що коефіцієнт демпфування  $f$  в виразі моменту сил демпфування -  $f\beta$  визначається через коефіцієнт демпфування  $f_d$ , на якому сила в'язкого опору демпфера створює момент відносно осі підвісу гіродвигуна наступною залежністю:

$$f = f_d l_d^2. \quad (2.9)$$

Для вкладання виразу моменту дебалансу використаємо наступну залежність

$$M = \rho \times F$$

Застосуємо до моменту дебалансу відносно осі  $y$  цю формулу можна записати в вигляді

$$M_y = \rho_z * F_x - \rho_x * F_z = -m * (\rho_z \omega_x - \rho_x \omega_z), \quad (2.10)$$

де  $m$  – маса рухомої частини приладу:  $\rho_x, \rho_z$  – зміщення центру мас рухомої частини приладу вздовж осей  $x$  та  $z$  відносно осі  $y$ ,  $\omega_x, \omega_z$  – складові абсолютного прискорення центру мас приладу [1].

Вираз моменту зовнішніх сил відносно осі  $y$  можна записати в вигляді

$$M_y = -c * \beta - f * \dot{\beta} - M_T \text{sign} \beta - m * (\rho_z \omega_x - \rho_x \omega_z). \quad (2.11)$$

З урахуванням (2.11) рівняння (2.6) можна записати в вигляді

$$J_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + c \beta = H \omega_\xi \cos \beta - H \omega_\xi \sin \beta - J_y \omega_\eta + (J_z - J_x)(\omega_\xi \cos \beta - \omega_\xi \sin \beta) (\omega_\xi \sin \beta + \omega_\xi \cos \beta) - M_T \text{sign} \beta - m(\rho_z \omega_x - \rho_x \omega_z). \quad (2.12)$$

Перепишемо рівняння (2.12) в вигляді

$$J_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + c \beta = H \omega_\xi - H \omega_\xi \left( \frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{4} \beta^4 + \dots \right) - H \omega_\xi \sin \beta - J_y \omega_\eta + (J_z - J_x)(\omega_\xi \cos \beta - \omega_\xi \sin \beta)(\omega_\xi \sin \beta + \omega_\xi \cos \beta) - M_T \text{sign} \beta - m(\rho_z \omega_x - \rho_x \omega_z).$$

Тут в виразі  $H \omega_\xi \cos \beta$  функція  $\cos \beta$  розкладена (з урахуванням малості  $\beta$ ) в ряд. Лінійний і нелінійний член розкладення записані роздільно в вигляді  $H \omega_\xi$  і

$$-H \omega_\xi \left( \frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{4} \beta^4 + \dots \right)$$

Перепишемо тапер це рівняння в вигляді

$$J_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + c \beta = H \omega_\xi + M_\Pi, \quad (2.13)$$

де

$$M_\Pi = -H \omega_\xi * \left( \frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{4} \beta^4 + \dots \right) - H \omega_\xi \sin \beta - J_y \omega_\eta + (J_z - J_x) * (\omega_\xi \cos \beta - \omega_\xi \sin \beta) * (\omega_\xi \sin \beta + \omega_\xi \cos \beta) - M_T \text{sign} \beta - m * (\rho_z \omega_x - \rho_x \omega_z). \quad (2.14)$$

В правильно спроектованому приладі, що забезпечує достатньо високу точність, вплив моментів-перешкод повинно бути малим, тобто повинна виконуватися нерівність

$$|M_\Pi| \ll |H \omega_\xi|. \quad (2.15)$$

Тому при розгляданні ГТ, характеру перехідного процесу впливом моментів-перешкод зазвичай нехтують, використовуючи лінеаризоване рівняння

$$J_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + c\beta = H\omega_\xi. \quad (2.16)$$

Розуміється, нехтувати моментами-перешкодами неможна при оцінці похибки приладу.

Лінеаризоване рівняння (2.16) часто записують в вигляді

$$\ddot{\beta} + 2h\dot{\beta} + \omega_0^2\beta = \frac{H}{J_y}\omega_\xi, \quad (2.17a)$$

де  $h = \frac{f}{2*J_y}$  - коефіцієнт затухання власних коливань;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{J_y}}$  - частота власних незатухаючих коливань.

Замість коефіцієнта затухання  $h$  використовують також відносний коефіцієнт затухання  $\zeta = \frac{h}{\omega_0}$ . Застосовують також інший запис рівняння:

$$T^2 \ddot{\beta} + 2\zeta T \dot{\beta} + \beta = \frac{H}{c} * \omega_\xi, \quad (2.17b)$$

де  $T^2 = \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{J_y}{c}$ .

Для моделювання гіроскопічного тахометра (датчика кутової швидкості) необхідно підготувати математичну модель гіроскопічного тахометра, зручну для використання.

Моделювання проведемо в пакеті Matlab.

Запишемо рівняння (2.17a) в наступному вигляді

$$\ddot{\beta} = \frac{-f\dot{\beta} - c\beta + H\omega_\xi}{J_y}$$

Лістинг файлу Model.m

```
Clc
```

```
Clear all
```

```
%Глобальні параметри
```

```
global I f c H omega_ksi Amplitude Frequency
```

```
%Вхідні параметри
```

```

I = 1.26e-3;
f = 2e-3;
c = 0.1;
H = 0.01;
omega_ksi = 0;
Amplitude = deg2rad(1);
Frequency = 0.8;
%Час інтегрування
Tk = 500;
%Початкові параметри
BT_0 = 0; BTt_0 = 0;
IP = [BT_0 BTt_0];

hi = 0.01; %Крок інтегрування
%Модель симулінк
sim('Sim');
t_sim = tout;
Beta_sim = yout;
figure(1)
plot(t_sim, rad2deg(Beta_sim)),grid;
xlabel('Time (second)');
ylabel('\beta (degree)', 'FontSize', 12, 'FontWeight'
,'bold');
%% Функція ODE45
[tout, yout] = ode45('Function', [0 Tk], IP);
figure(2)
plot(tout, rad2deg(yout(:,1))), grid;
xlabel('Time (second)');
ylabel('\beta (degree)', 'FontSize', 12, 'FontWeight'
,'bold');

```

Лістинг файлу Base\_Move.m

```
function omega_k = Base_Move( t )
global omega_ksi Amplitude Frequency;
omega_k = omega_ksi*t + Amplitude*sin(Frequency*t);
end
```

Лістинг файлу Function.m

```
function z = Function( t, IP )
global I f c H;
omega_k = Base_Move(t);
z(1) = IP(2);
z(2) = (-f*IP(2) - c*IP(1) + H*omega_k)/I;
z = z'; end
```

Схеми в пакеті Simulink

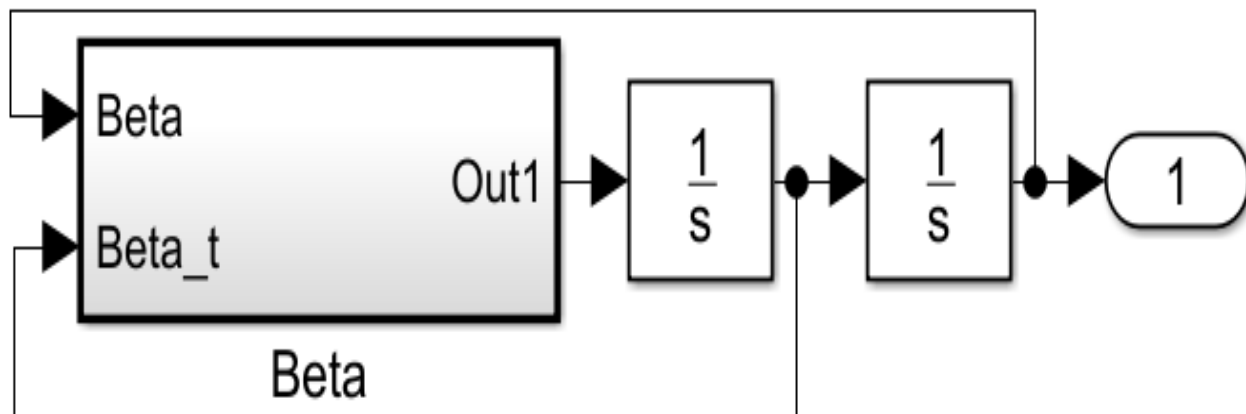


Рисунок 2.4 Результати виконання моделі Simulink

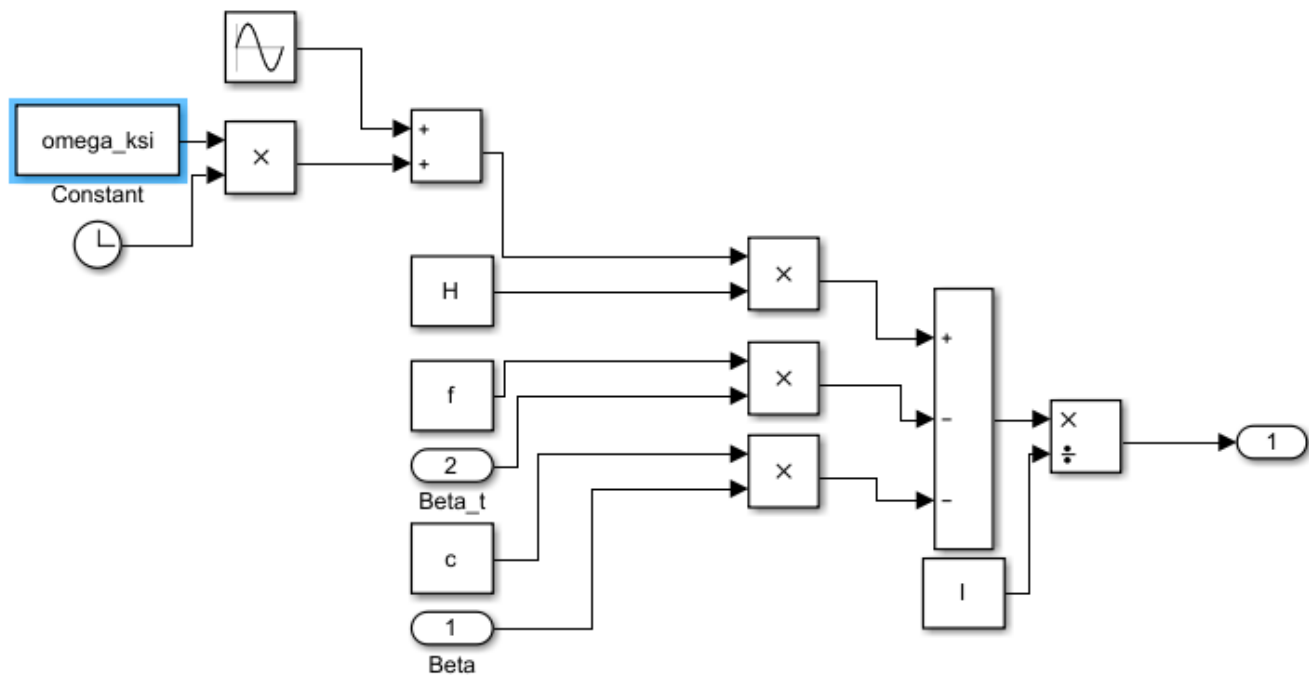


Рисунок 2.5 Результати виконання моделі Simulink

Результати виконання моделювання при параметрах:

Amplitude = deg2rad(1);

Frequency = 0.8;

Tk = 100; % Час інтегрування

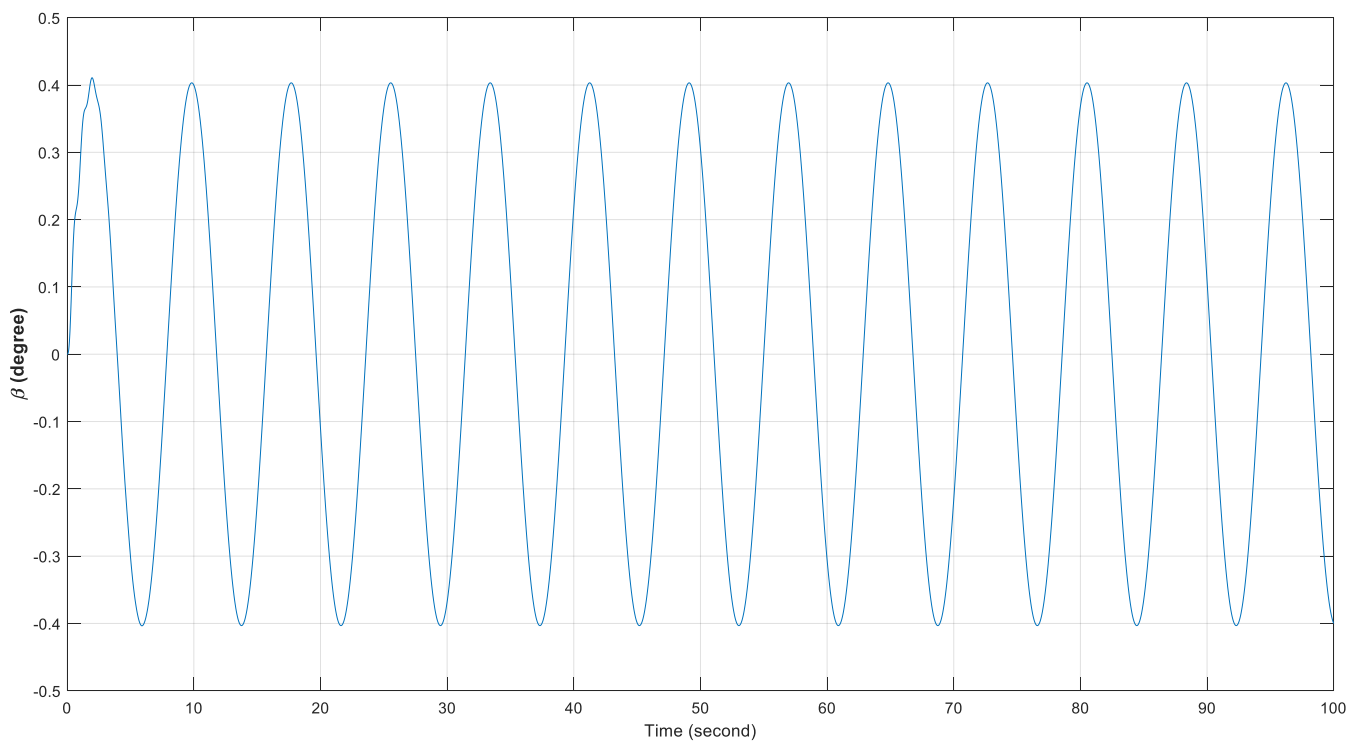


Рисунок 2.6 Результати виконання моделі Simulink

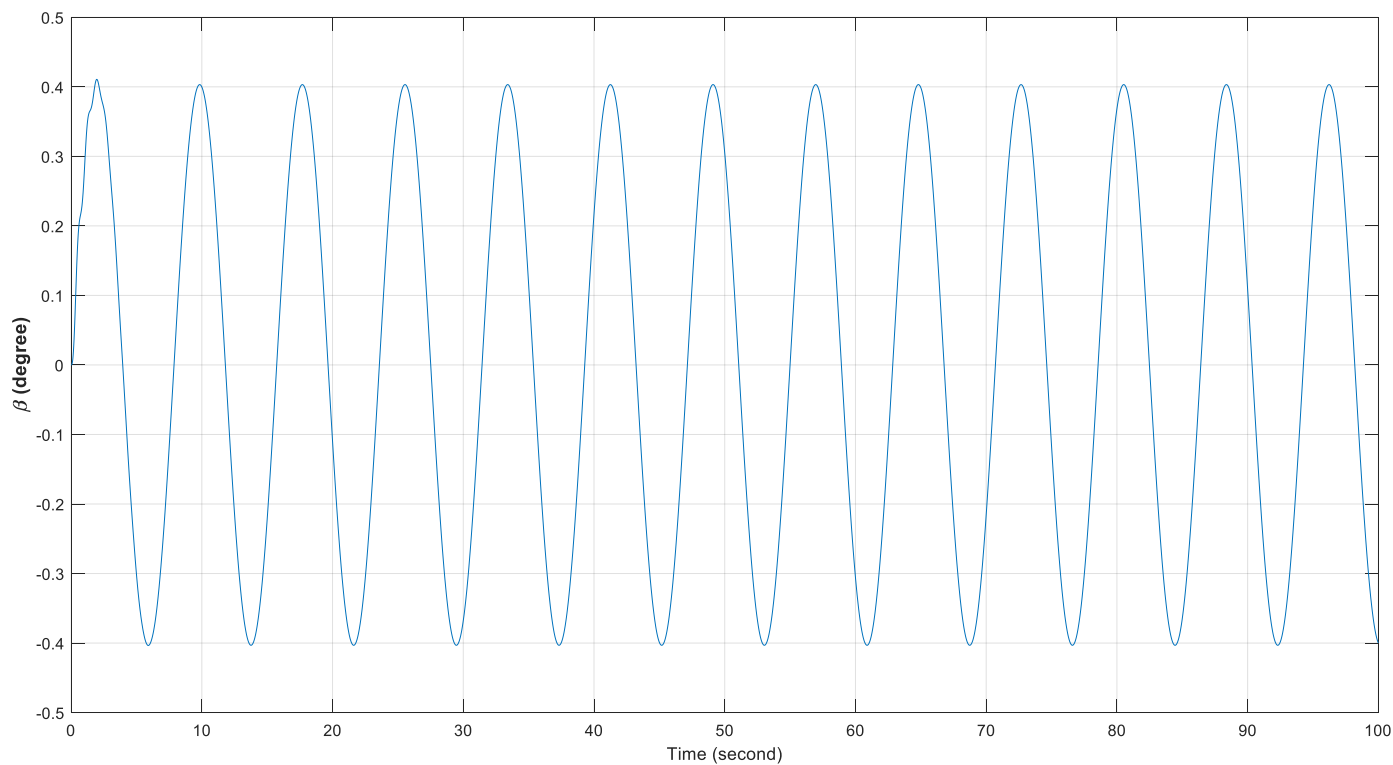


Рисунок 2.7 Результати інтегрування за допомогою функції ode45

Результати виконання моделювання при параметрах:

`Amplitude = deg2rad(30);`

`Frequency = 0.01;`

`Tk = 600; % Час інтегрування`

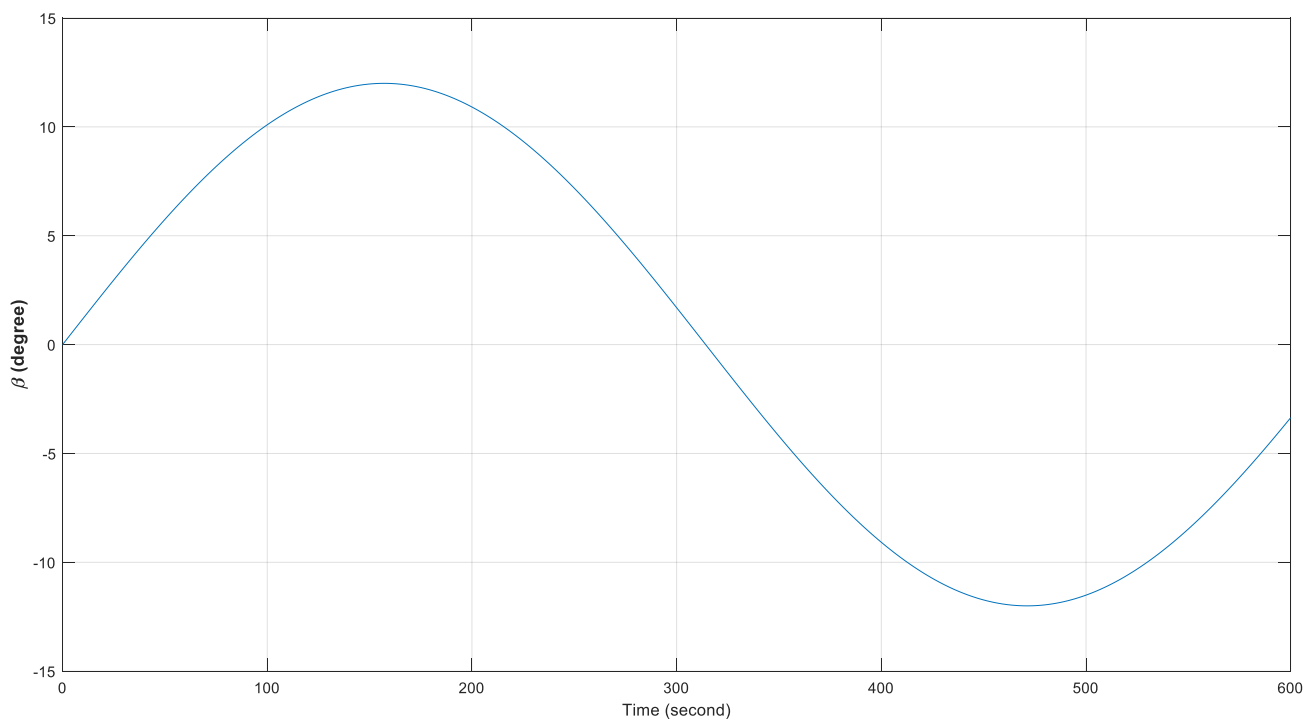


Рисунок 2.8 Результати виконання моделі Simulink



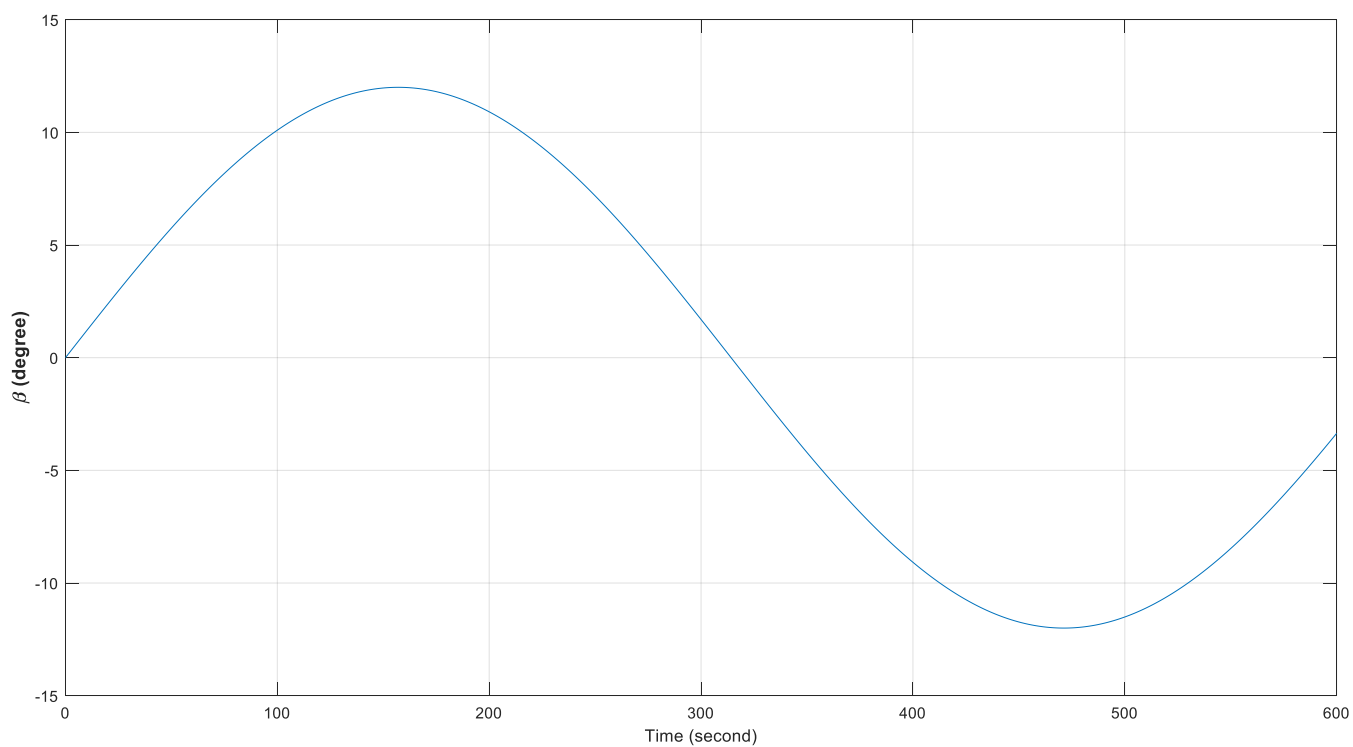


Рисунок 2.9 Результати інтегрування за допомогою функції ode45

## **Висновок**

Під час виконання дипломного проекту були розглянуті різноманітні схеми приладів, що дозволяють вимірювати кутову швидкість. При рішенні поставленої задачі дипломного проекту, а саме розрахунку та проектування датчика кутової швидкості, враховуючи надані дані було обрано схему ДКШ з електричною пружиною.

Також в дипломному проекті було обґрунтовано вибір конструктивної схеми, розглянуто її переваги та недоліки. Було проведено розрахунок основної методичної похибки, а саме похибки від моментів тертя, визначена температура перегріву приладу та розроблення конструкції датчика кутової швидкості.

Завершальним етапом було створено математичну модель рівняння руху гіроскопічного тахометра в середовищі Matlab за допомогою двох різних методів для більшої достовірності результатів моделювання.

### Список використаної літератури

1. Коновалов С.Ф., Никитин Е.А., Селиванова Л.М. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. М.: Высш. шк. 1980, Ч.3;
2. Никитин Е.А., Балашова А.А. Проектирование дифференцирующих и интегрирующих гироскопов и акселерометров.
3. Бондар П.М. Вимірювальні перетворювачі, прилади та системи (конспект лекцій)
4. *Одинцов А. А.* Теория и расчет гироскопических приборов. – К.: Высш. шк. Головное издательство, 1985. – 392с.
5. *Одинцов А. А.* Теория гироскопов и гироскопических приборов. – К.: Головное издательство, 1976. – 264с.
6. *Пельпор Д. С. и др.* Гироскопические системы. – М.: Высш. шк., 1971 – 488с.
7. *Пельпор Д. С. и др.* Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем: В 2-х ч. – М.: Высш. шк., 1977. – Ч. 1 – 2.
8. *Ривкин С. С.* Теория гироскопических устройств: В 2-х ч. – Л.: Судпромгиз, 1962 – 1964. – Ч. 1 – 2.
9. *Ройтенберг Я. Н.* Гироскопы – М.: Наука, 1966. – 400с.
10. *Сайдов П. И.* Теория гироскопов – М.: Высш. шк., 1965. – 470с.